

Л.М.Диамант, А.М.Искольдский, Ю.Е.Нестерихин

Система коммутации электронного изображения  
в электронно-оптическом преобразователе типа  
„ЗИС“ с сеточным затвором  
Наносекундный фоторегистратор на основе  
прибора „ЗИС-1“

Л.М.Диамант, А.М.Искольдский, Ю.Е.Нестерихин

СИСТЕМА КОММУТАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ  
В ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ТИПА  
"ЗИС" С СЕТОЧНЫМ ЗАТВОРОМ

НАНОСЕКУНДНЫЙ ФОТОРЕГИСТРАТОР НА ОСНОВЕ  
ПРИБОРА "ЗИС-І"

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе кратко рассмотрены некоторые вопросы, связанные с построением схемы управления наносекундным электронно-оптическим преобразователем типа ЗИС-І с сеточным затвором.

Приводятся электрические параметры затворного и отклоняющего узлов ЭОП; формулируются требования к выходным импульсам управляющего устройства.

Рассмотрены возможные схемы задающих и выходных блоков для обеспечения режима кадровой фотосъемки с минимальной длительностью экспозиции одного кадра  $\approx 8$  нсек и минимальным интервалом между последовательными кадрами  $\approx 50$  нсек. Обсуждаются возможности повышения быстродействия отклоняющего узла ЭОП. Приводятся схемные решения и параметры блока затворных и отклоняющих импульсов, характеристики наносекундного фоторегистратора на основе прибора ЗИС-І и фотографии тест-таблицы, сделанные с экспозицией 10 нсек.

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) являются чрезвычайно эффективным инструментом исследования быстропротекающих процессов, сопровождающихся испусканием света ( $L_1, L_2$ ). Изготавливаемые нашей промышленностью ЭОП типа ПИМ-3 и многокаскадные ЭОП с управляющей головкой типа ПИМ-3 позволяют исследовать быстропротекающие процессы в режиме непрерывной развертки с временным разрешением порядка  $10^{-12}$  сек ( $L_3$ ). Однако, использование этих приборов в режиме кадровой фотосъемки с длительностью экспозиции одного кадра  $\tau_{\text{экс.}} \ll 50$  нсек в силу ряда причин ( $L_4$ ) затруднительно. В связи с этим был разработан ЭОП с сеточным затвором ( $L_5$ ) типа ЗИС-1, допускающий фотосъемку с  $\tau_{\text{экс.}} \approx 3$  нсек. ЭОП типа ЗИС-1 по своим параметрам близок к приборам, используемым в лупе времени STL ( $L_6$ ).

Поскольку получение коротких импульсов сложной формы, необходимых для управления ЭОП, встречает существенные затруднения, имеет смысл рассмотреть возможные схемы и пути реализации управляющих блоков, обеспечивающих максимальное использование положительных качеств ЭОП типа ЗИС-1.

#### Параметры ЭОП. Требования к управляющим импульсам

Характерные параметры прибора ЗИС-1, определяющие требования к статическому и импульсному режиму прибора (рис.1), приведены в таблице I.

Особенностью ЭОП с сеточным затвором является конечная прозрачность управляющей сетки. По данным испытаний ( $L_7$ ), отношение полезной яркости экрана к фону у ЭОПов типа ЗИС-1 составляет в настоящее время  $\approx 10^4$ . Кроме того, некоторая асимметрия прибора, неизбежно появляющаяся из-за неточности сборки, требует (для повышения разрешающей способности) изменения среднего потенциала между отклоняющими пластинами при смещении изображения от центра к краям экрана.

Таблица I

№	П а р а м е т р	Ед.изм.	
1.	Ускоряющее напряжение	кВ	16
2.	Напряжение запирания $U_{\text{фк-с}}$	В	+ 50
3.	Напряжение насыщения $U_{\text{фк-с}}$	В	- 50 - 100
4.	Ёмкость фотокатода $C_{\text{фк}}^*$	пФ	23,5
5.	Ёмкость сетки $C_{\text{с}}^*$	пФ	27,5
6.	Ёмкость фокус.электродов $C_{\text{фэ}}^*$	пФ	14,7
7.	Ёмкость между пласт. $C_{\text{пл}}$	пФ	2,2
8.	Ёмкость пластина-анод $C_{\text{пл-а}}$	пФ	4,2
9.	Отклоняющее напряжение	В/мм	40
10.	Индуктивность ввода пластин, суммарная	мкГн.	0,1

ж Остальные электроды заземлены.

Сформулируем требования к системе управления ЭОП:

1. До начала фотографирования электронное изображение должно быть смещено за пределы рабочей части экрана.
2. Скважность затворных импульсов не должна превышать  $10 + 15$ . При этом фоновая засветка пренебрежимо мала.
3. Амплитуда затворных импульсов должна быть 100-150 В, неравномерность плоской части не более 10%.
4. Максимальная амплитуда отклоняющих импульсов (3-х ступеней) должна быть около 700В, отклонение парафазное.
5. Амплитуда каждой положительной и отрицательной ступени должна регулироваться в пределах  $\pm 50$  В.
6. Неравномерность вершины отклоняющего импульса не должна превышать  $10^{-2} + 5 \cdot 10^{-3}$  за время экспозиции.
7. Время установления одной ступени отклоняющего напряжения не должно быть больше минимального интервала между затворными импульсами.
8. Система управления должна обладать высокой помехоустойчивостью.

9. Задний фронт импульса отклонения не должен превышать длительность одного интервала между затворными импульсами.

#### Формирователь затворных импульсов

Запишем требования к затворным импульсам, исходя из общих требований к системе управления и принимая схему включения ЭОП с подачей затворного импульса на фотокатод (рис.Б).

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| 1) Полярность                    | - отрицательная                            |
| 2) $t_u$ длит.импульса           | мин. - 5 + 8 нсек.<br>макс.- 200 нсек.     |
| 3) $t_\phi$ длит.фронта и скола  | мин. - 1,5 - 2 нсек.<br>макс.- 5 + 8 нсек. |
| 4) Неравномерность плоской части | 10%  |
| 5) Амплитуда напряжения          | 100 - 150 в.                               |

Рассмотрим возможные схемы.

а) Схема с мощной лампой (рис.2).

Для реализации указанных параметров требуется зарядить входную ёмкость ЭОП ( $C_{фк} = 24$  пф) за время, равное 1,5 + 2 нсек до напряжения 100 - 150 в. Постоянная времени цепи заряда ёмкости  $C_{фк}$

$$\tau_3 = \frac{R_a R_n}{R_a + R_n} (C_{фк} + C_m + C_{вых}) = R_3 C_3 \approx 0,5 \div 0,7 \text{ нсек.}$$

Здесь  $R_3 = \frac{R_a R_n}{R_a + R_n}$  - эквивалентное сопротивление нагрузки лампы

$C_3 = C_{фк} + C_m + C_{вых}$  - эквивалентная ёмкость нагр.

$C_{вых.}$  - выходная ёмкость лампы  $\approx 5$  пф

$C_m$  - ёмкость монтажа  $\approx 10$  пф.

$$\text{Определим } R_3 = \frac{\tau_3}{C_3} = \frac{0,5 \cdot 10^{-9}}{39 \cdot 10^{-12}} = 13 \text{ ом}$$

Следовательно, для получения 150 в импульса потребуется ток лампы 10 - 12 ампер в импульсе, что близко к предельному току даже таких мощных ламп, как ГМИ-6, ГИ-30.

б) Схема на лампах со вторичной эмиссией (ЛВЭ) и перезарядом паразитных ёмкостей (рис.3).

Известно, что при ёмкостной нагрузке усилителя передний фронт выходного импульса круче заднего за счет активного разряда паразитных ёмкостей через лампу усилителя. Этот эффект тем сильнее, чем больше сопротивление нагрузки лампы. Если для заряда паразитных ёмкостей применить другую лампу, задний фронт можно сделать столь же крутым. Однако при применении обычных ламп такое решение проблемы встречает существенные трудности. ЛВЭ позволяют просто решить такую задачу. Схема (рис.3) работает следующим образом: анодное напряжение  $L_1$  ниже анодного напряжения  $L_2$  на 100-120 в. Динод  $L_2$  соединен с анодом  $L_1$ . В аноде  $L_2$  и диноде  $L_1$  установлены накопительные ёмкости.

С приходом отпирающего импульса на сетку  $L_1$  ёмкость на грузки  $C_{фк}$  и паразитные ёмкости разряжаются анодным током  $L_1$  и на ёмкости  $C_{фк}$  устанавливается напряжение, равное

$$U_{фк} = U_{о.фк} - J_{a1} R_{a1}$$

при условии, что разделительная ёмкость  $C_p \gg C_{фк}$  и  $R_n \gg R_a$ . В момент окончания импульса на управляющей сетке  $L_2$  появляется скальвающий импульс, который отпирает ее. Ёмкость нагрузки заряжается динодным током  $L_2$ . Напряжение питания  $U_{a2}$  выбрано большим, чем  $U_{a1}$ , для повышения крутизны заднего фронта импульса.

Оценим необходимые токи.

$$C_3 = C_{фк} + 2C_{вых} + C_m \approx 50 \text{ пф}$$

Чтобы зарядить эту ёмкость за 2 нсек до 150 в требуется ток

$$I = \frac{CU}{t} = \frac{150 \cdot 50 \cdot 10^{-12}}{2 \cdot 10^{-9}} = 3,75 \text{ а,}$$

что легко получить на лампах 6В2П.

#### Возможные варианты схем, формирующих парафазное ступенчатое напряжение

Исходя из вышеизложенных требований к схеме управления ЭОП, можно предложить следующие схемы при формировании отклоняющего напряжения:

а) схема с разрядом калибрующих ёмкостей (рис.4).

Схема работает следующим образом:

В исходном состоянии ключи  $K_1, K_2, K_3, K_4$  разомкнуты, и калибрующие ёмкости заряжены до напряжений  $U_1, U_2, U_3$  через зарядные сопротивления  $R_1, R_2, R_3$ . Ёмкость  $C_{пл.э} = C_{пл} + C_m$  шунтирована большим сопротивлением  $R_4$ .

В момент начала I-й ступени замыкается ключ  $K_1$ , и ёмкость  $C_I$  разряжается на ёмкость  $C_{пл.э}$ . После процесса перезаряда ключ размыкается. Если собственная ёмкость ключа невелика, это не окажет существенного влияния на напряжение, приложенное к отклоняющим пластинам, т.к. велико  $R_4$ . Аналогично разряжаются калибрующиеся ёмкости  $C_2$  и  $C_3$ .

Достоинством такой схемы является отсутствие зависимости отклоняющего напряжения от параметров управляющего сигнала после процесса перезарядки; простая регулировка напряжения отдельных ступеней; возможность формировать достаточно длинные импульсы. К недостаткам схемы следует отнести повышенные требования к собственной ёмкости, прямому сопротивлению и быстродействию ключа.

б) Схема с токовыми ключами (рис.5).

Схема работает следующим образом: ключи  $K_1-K_4$ ;  $K_2-K_5$ ;  $K_3-K_6$  синхронизованы во времени. Поочередно замыкая их, получим на сопротивлениях нагрузки  $R_1$  и  $R_2$  положительные и отрицательные ступени. Временная диаграмма работы такой схемы показана на рис.5. Достоинством схемы является простота регулирования напряжения ступеней. К недостаткам же следует отнести необходимость стабилизации величины тока ключа, постоянное протекание тока во время импульса.

Особенностью схемы с токовыми ключами является различное направление токов в генераторах  $I_1, I_2, I_3$  и  $I_4, I_5, I_6$ . Это затрудняет создание такой схемы на обычных лампах, однако на лампах со вторичной эмиссией реализация ее существенно упрощается (рис.6).

Скорость нарастания напряжения на отклоняющих пластинах ЭОП ограничена собственной частотой колебаний контура, образованного выходной ёмкостью ламп, индуктивностью выводов пластин и ёмкостью отклоняющей системы (250-300 мГц). Для предотвраще-

ния колебаний контур этот необходимо шунтировать сопротивлением нагрузки формирователя импульсов отклонения, которое выбирается из условий аперодичности:

$$R_n \approx \frac{\rho}{2}$$

где  $\rho$  - волновое сопротивление контура.

#### Задающий блок

Для обеспечения режима трехкадровой фотосъемки требуется создать синхронизированные во времени импульсы, управляющие формирователем затворных и отклоняющих напряжений. Рассмотрим систему, изображенную на рис.7.

Задающий блок работает следующим образом: синхронизирующий импульс, разрешающий фотографирование ("Пуск"), запускает генератор строба I, представляющий собой мультивибратор на лампе со вторичной эмиссией (ЛВЭ) 6В2П с обр.связью анод-катод (см.рис.9). Положительный импульс с динода  $L_1$  подается на 2-ю сетку задающего мультивибратора. Задающий мультивибратор собран на ЛВЭ 6В2П по схеме с обратной связью анод-катод и заперт по 2-й сетке (0в). I-я сетка заземлена. При появлении импульса строба I на 2-й сетке мультивибратор начинает генерировать. Соотношения параметров генератора строба I и задающего мультивибратора выбраны так, чтобы за время строба мультивибратор генерировал 4 импульса. Минимальная длительность импульсов составляет 8 нсек на полувисоте, минимальный интервал между последовательными импульсами около 50 нсек.

С динода  $L_2$  импульсы поступают на ограничитель (рис.10), собранный на ЛВЭ 6В3С. Механизм работы такого ограничителя подробно описан в литературе (Л8). Усиленные и ограниченные импульсы имеют трапецеидальную форму, длительность фронтов около 2 нсек и неравномерность плоской части не более 10%.

С динода ограничителя положительные импульсы поступают на запуск формирователя затворного импульса. Отрицательные импульсы с анода ограничителя дифференцируются с постоянной времени около 4 нсек. Положительные дифференцированные импульсы, соответствующие заднему фронту затворного импульса, усиливаются и по-

ступают на лампу, формирующую скол затворного импульса, а также на запуск одновибраторов управления отклонением. Для того, чтобы от I импульса запустился I-й одновибратор, от 2 - второй и т.д., введена система стробирования, при которой все одновибраторы, кроме первого, заперты по 2-й сетке, и каждый предыдущий одновибратор, запускаясь, отпирает последующий. Чтобы 2 одновибратора не запустились одновременно, импульс питания 2-й сетки интегрируется с постоянной времени около 20 нсек; этим обеспечивается последовательность обрабатывания. От 4-го импульса запускается схема срыва (такой же одновибратор, как и предыдущие) и запирает I-й одновибратор. Импульсы одновибраторов (1,2,3) ограничиваются и поступают на управление токовыми ключами.

#### Нестабильности

Нестабильность момента подачи затворного импульса на сетку ЭОП при принятой блок-схеме складывается из:

- а) нестабильности момента запуска генератора строга I;
- б) нестабильности момента запуска мультивибратора;
- в) нестабильности длительности импульса мультивибратора;
- г) нестабильности времени восстановления мультивибратора.

Подробное исследование генераторов на ЛВЭ ( $L_9, L_{10}$ ) показывает, что при стабилизации питающих напряжений с точностью 1% нестабильность длительности импульса и времени восстановления мультивибратора не превышает 1-2% от номинальных значений, а нестабильность момента запуска при этом не превышает 0,5-1 нсек.

#### Наносекундный фоторегистратор

В настоящее время изготовлена регистрирующая камера на основе ЭОПа ЗИС-I, в которой используется описанный выше задающий блок, формирователь затворных импульсов на ЛВЭ с перезарядом паразитных ёмкостей и формирователь отклоняющих импульсов с токовыми ключами на ЛВЭ. Это дает возможность формировать затворные импульсы с фронтами  $t_f \approx 1,5$  нсек и парафазные ступенчатые импульсы отклонения с  $t_f \leq 10$  нсек.

Существует целый ряд экспериментов, при которых интегральный световой поток, поступающий во входное окно ЭОП, превышает

количество света за время экспозиции не более чем в  $10^3-10^4$  раз. Кроме того, как правило, ЭОП имеют ослабление, вносимое сеткой, существенно лучше, чем  $10^4$ . Все это позволяет во многих случаях (например, при исследовании бесстолкновительных ударных волн в разреженной плазме, в исследовании процессов электрического пробоя и т.п.) использовать нулевой, не отклоняемый кадр (см. рис.8), что увеличивает исследовательские возможности и уменьшает мертвое время прибора (время от момента поступления пускового импульса до начала экспонирования первого кадра) до нескольких наносекунд.

Характеристики регистрирующей камеры:

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| 1. Число кадров               | 4 (3)   |
| 2. Размер кадра на экране ЭОП | 10 x 10 мм  |
| 3. Время экспозиции I кадра   | 10; 20; 50; 100; 200 нсек.                          |
| 4. Интервал между кадрами     | 50; 160; 400; 800; 1600 нсек.                       |
| 5. Разрешающая способность    | - 12 п.л./мм (при $\tau_{\text{эксп.}} = 10$ нсек). |
| 6. Мертвое время прибора      | $t_0 \leq 10$ нсек.                                 |

На рис.11 приведены осциллограммы рабочих импульсов, на рис.12 - общий вид регистратора, на рис.13 - фотография тест-таблицы, сделанная с экрана ЭОП при  $\tau_{\text{эксп.}} = 10$  нсек и  $T_k = 50$  нсек.

Авторы признательны М.М.Карлинеру за полезные советы и и постоянное внимание к работе.



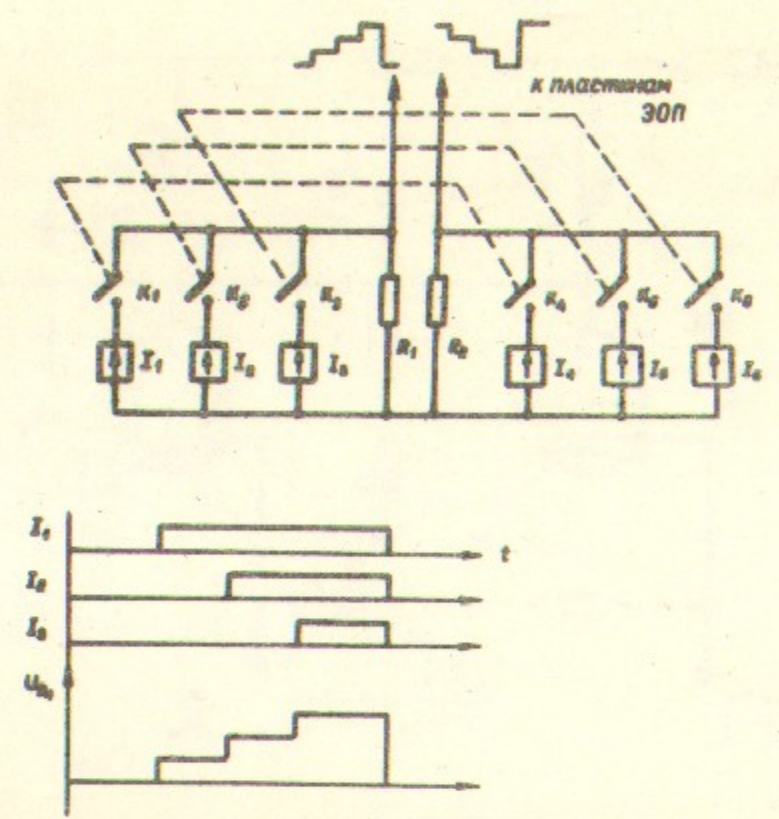


Рис.5. Схема с токовыми ключами. Временная диаграмма токов.

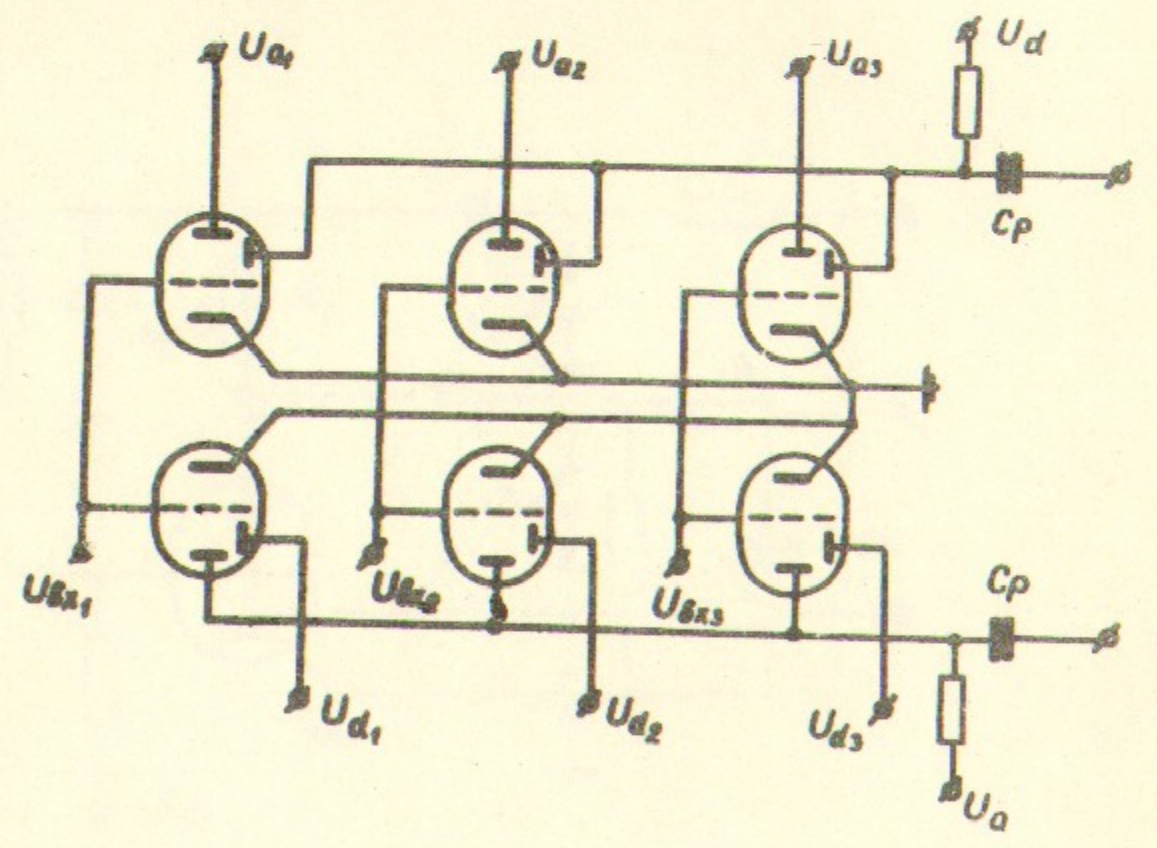


Рис.6. Схема ключей на ЛВЭ.

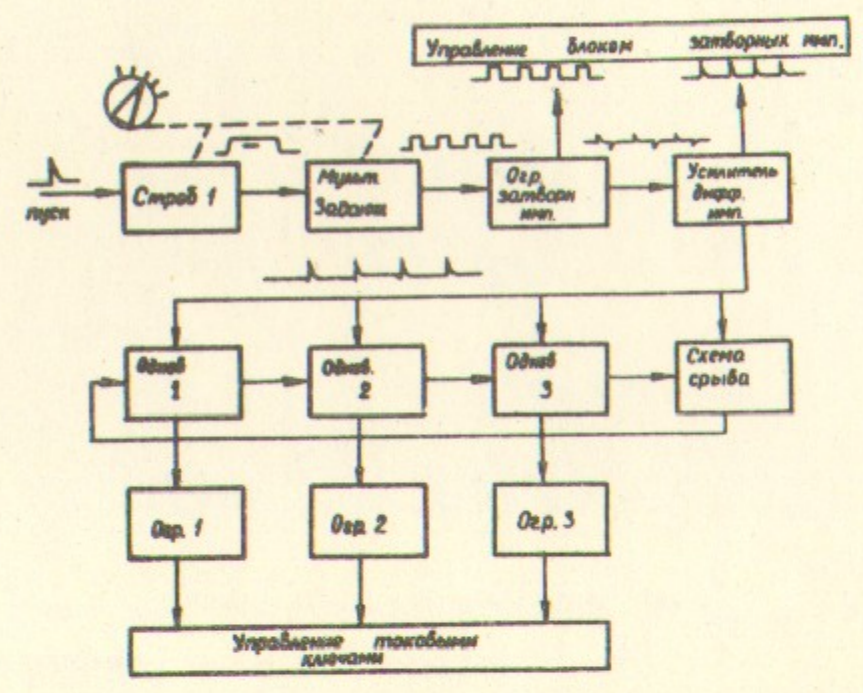


Рис.7. Блок-схема задающего блока.

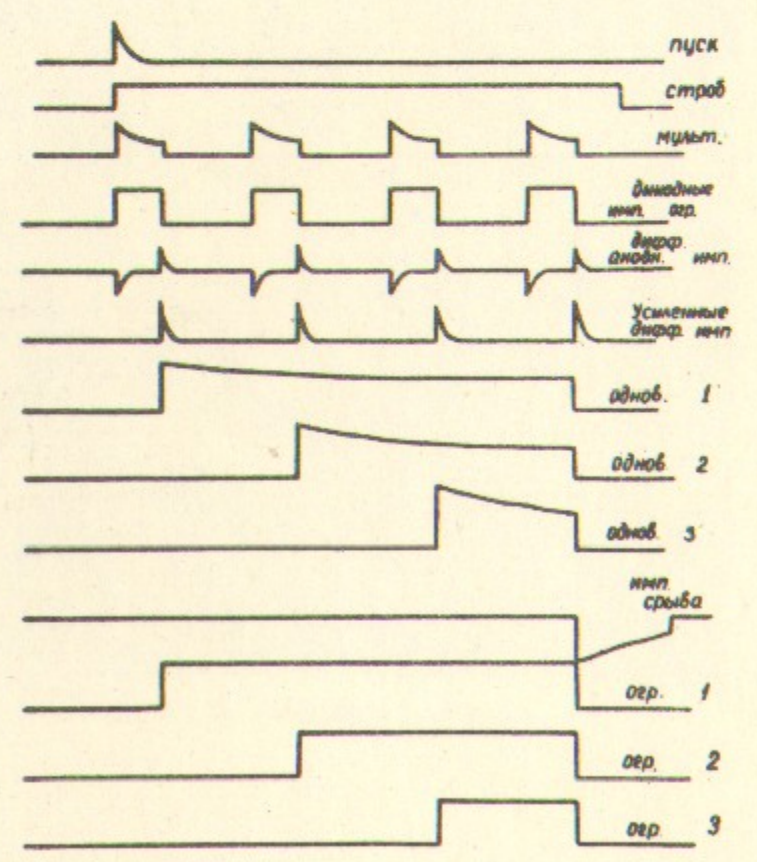


Рис.8. Временная диаграмма работы задающего блока.



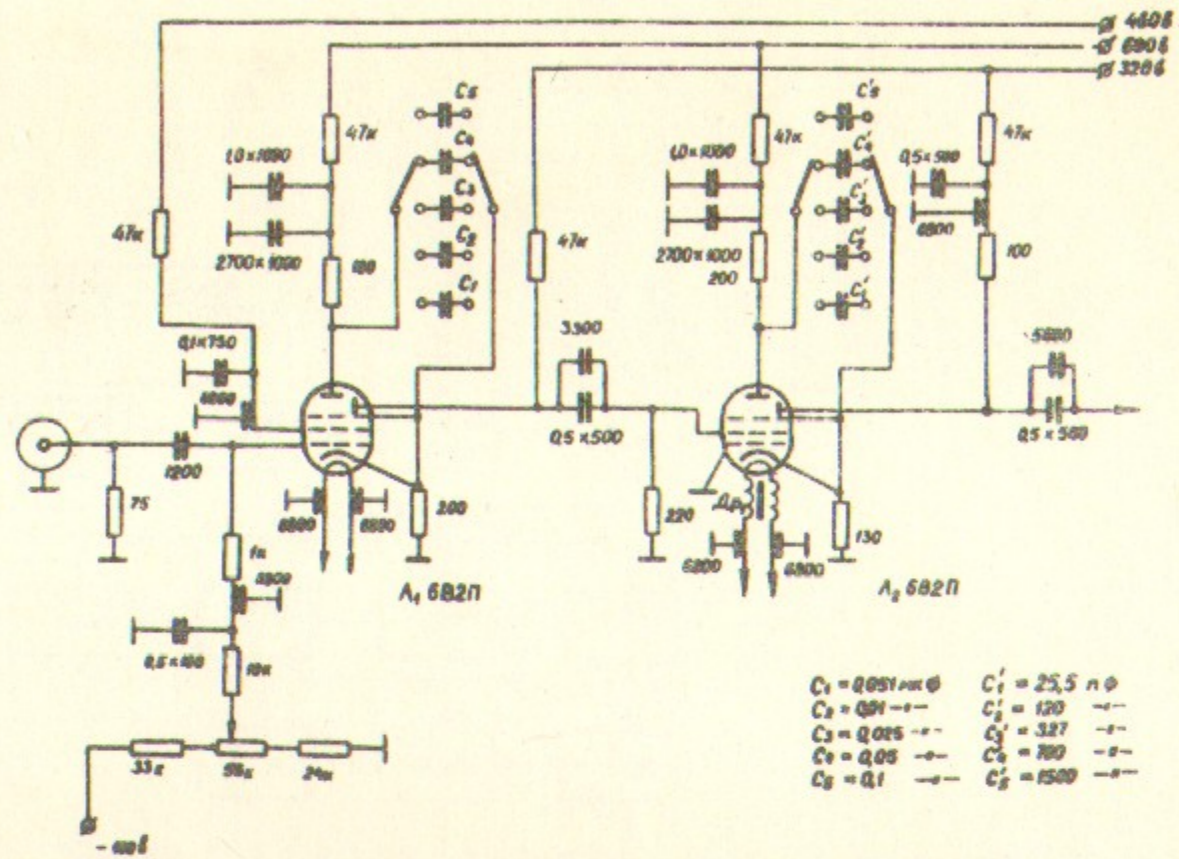


Рис.9. Генератор строба I и задающий мультивибратор.

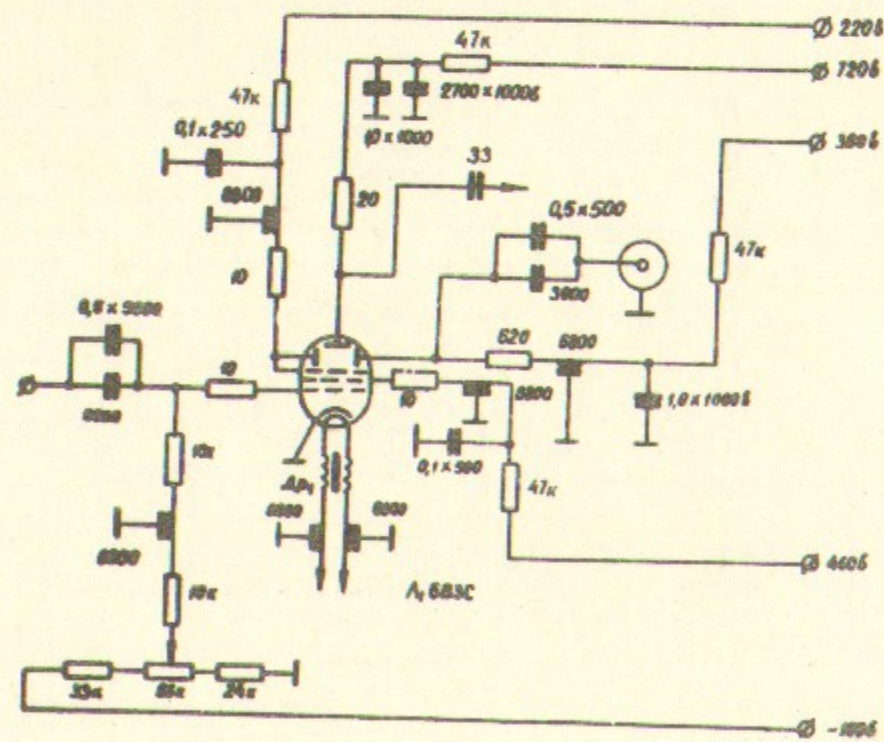


Рис.10. Ограничитель.

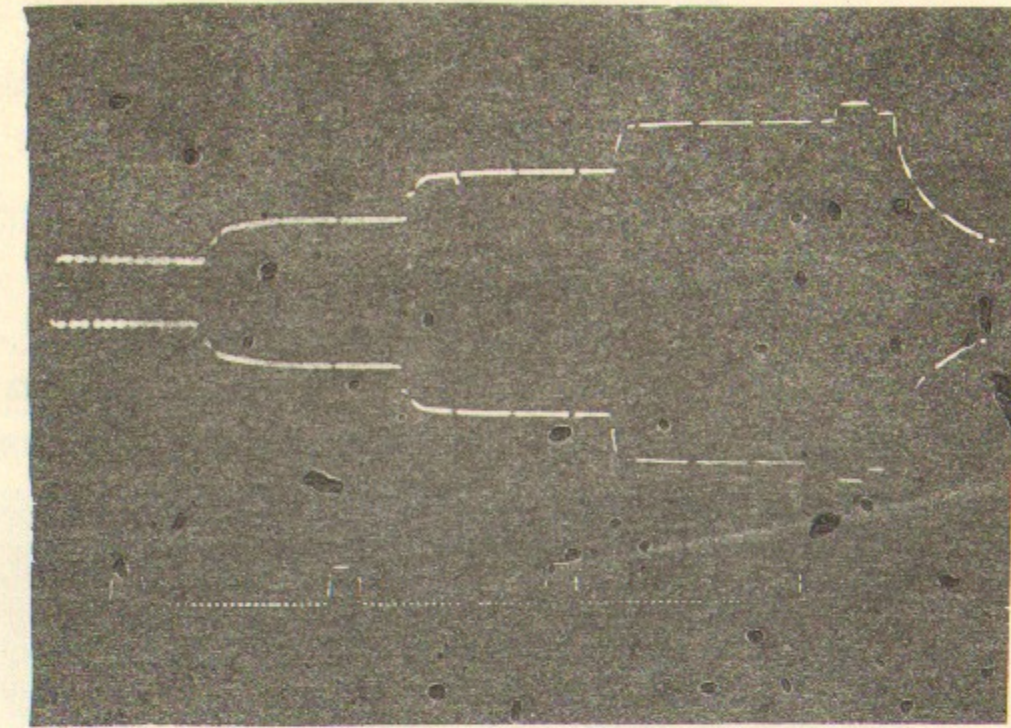


Рис.11. Рабочие импульсы регистрир.системы  $\tau_{\text{эксп.}} = 10 \text{ нсек.}$   
 $T_k = 50 \text{ нсек.}$

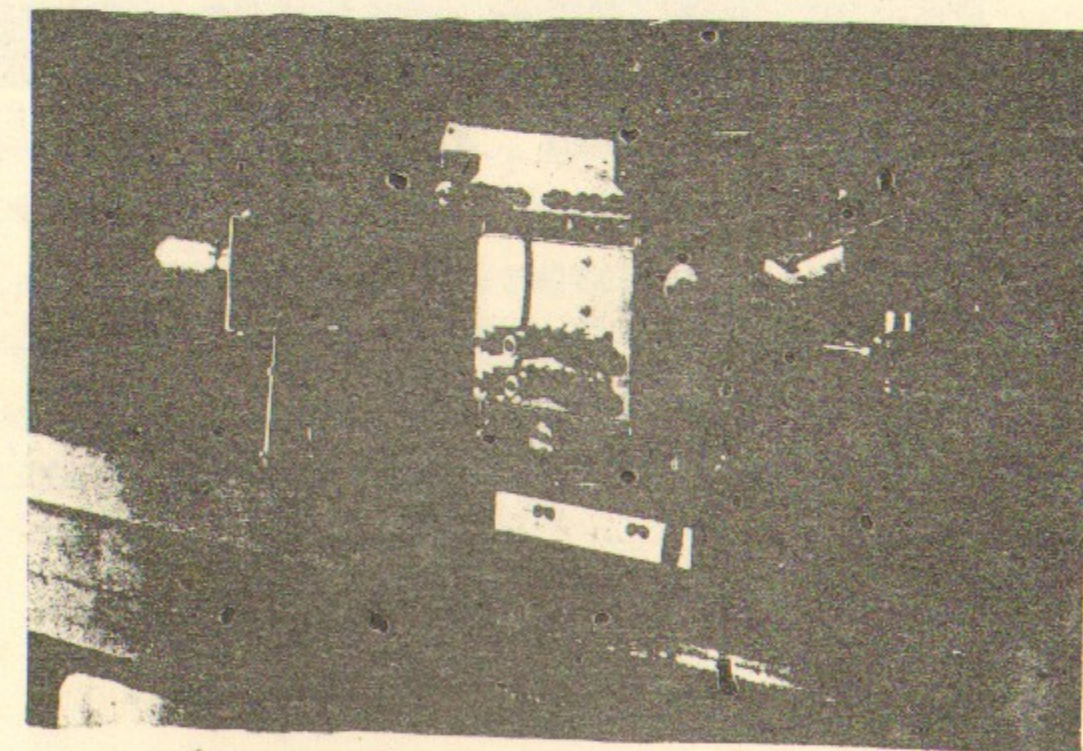


Рис.12. Общий вид регистратора.

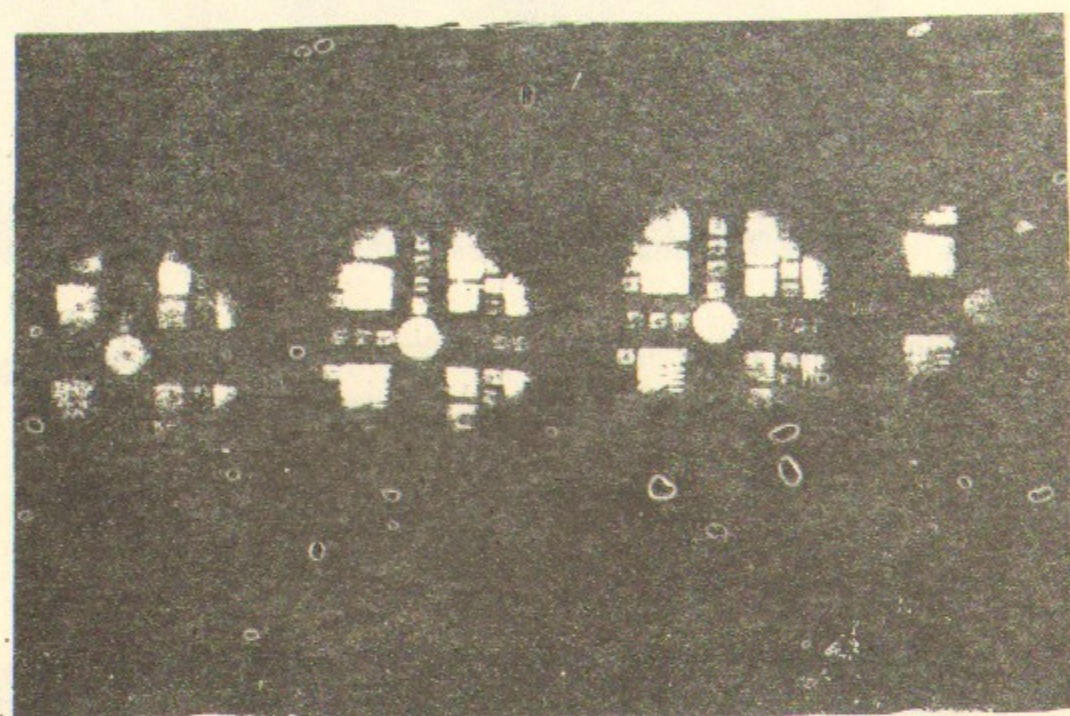


Рис. 13. Фотография тест-таблицы, сделанная с экрана ЭОП.

#### Л и т е р а т у р а

1. Завойский Е.К., Бутслов М.М., Плахов А.Г., Смолкин Г.Е. Атомная энергия I, № 4, 34 (1956).
2. Нестерихин Ю.Е., Пергамент М.И., Комельков В.С. Proc. Fifth. Int. Congr. on High-Speed Photography (Washington D.C. 1960) SMPTE 1962. p.118
3. Завойский Е.К., Фанченко С.Д. Высокоскоростная фотография с экспозицией  $10^{-9}$ - $10^{-14}$  сек на основе применения электронно-оптических преобразователей. Препринт ИАЭ - 1061, 1966.
4. Искольдский А.М., Нестерихин Ю.Е., Федоров В.М. Фоторегистрация быстрых процессов в наносекундной области времен. Доклад на Всесоюзном симпозиуме по наносекундной импульсной технике и её применение в физических исследованиях. Горький, 1965.
5. Нестерихин Ю.Е., Солоухин Р.И. Методы скоростных измерений в газодинамике и физике плазмы, изд. "Наука", 1967.
6. Каталог № 0164 STL - камера TRW-products USA.
7. Гявгянен Л.В., Искольдский А.М., Нестерихин Ю.Е., Федоров В.М. (В печати).
8. Егоров А.А., Самохин И.А., Юдин Л.И. Ограничитель на лампе со вторичной эмиссией. ПТЭ № 4, 1965.
9. Серов А.Ф., Юдин Л.И. О стабильности длительности импульсов генератора на лампе со вторичной эмиссией. ПТЭ № 5, 1965.
10. Егоров А.А., Самохин И.А., Юдин Л.И. Прибор для точной синхронизации пусковых импульсов с заданной фазой высокочастотного напряжения. ПТЭ № 3, 1966.

---

Ответственный за выпуск Диамант Л.М.  
Подписано к печати 7.IX-1967 г.  
Усл.0,7 печ.л., тираж 250 экз. Бесплатно.  
Заказ № 151

---

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР.